



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Off nl gungsschrift  
⑩ DE 195 31 465 A 1

⑤1 Int. Cl.<sup>8</sup>:  
**G 02 B 21/00**  
G 02 B 6/30  
G 02 B 1/02  
H 01 J 37/28

②1 Aktenzeichen: 195 31 465.4  
②2 Anmeldetag: 26. 8. 95  
④3 Offenlegungstag: 2. 10. 96

DE 195 31 465 A 1

③0 Innere Priorität: ③2 ③3 ③1  
30.03.95 DE 195116127

⑦1 Anmelder:  
Carl Zeiss Jena GmbH, 07745 Jena, DE; Institut für  
Festkörper- und Werkstofforschung Dresden e.V.,  
01069 Dresden, DE

⑦2 Erfinder:  
Weihnacht, Manfred, Dr., 92272 Freudenberg, DE;  
Bartzke, Karlheinz, Dr., 07747 Jena, DE; Martin,  
Günter, Dr., 01307 Dresden, DE; Richter, Wolfgang,  
Prof., Dr., 99425 Weimar, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑥4 Mikrooptische Sonde für Rastermikroskope

⑤7 Die mikrooptische Sonde ist derart ausgebildet, daß die dem Objekt zugewandte Seite des optischen Wellenleiters aus einer optisch hochbrechende Mikrotastspitze besteht und sie in beiden zur Lichtausbreitung senkrechten Richtungen jeweils zum Objekt hin auslaufend Abmessungen von annähernd  $B = \frac{\lambda}{2n}$  besitzt, wobei  $\lambda$  die Vakuumwellenlänge des verwendeten Lichtes und  $n$  der Brechungsindex des optischen Wellenleiters ist und daß der optische Wellenleiter mit dem piezoelektrischen Erreger mechanisch gekoppelt ist.

DE 195 31 465 A 1

Die Erfindung betrifft eine mikrooptische Sonde für Rastermikroskope.

Es ist allgemein bekannt, die Auflösungsgrenze der Lichtmikroskopie dadurch zu überwinden, daß mit Aperturen wesentlich kleiner als die Wellenlänge des Lichtes im Nahfeld der Oberfläche gearbeitet wird.

Mit der Entwicklung der Tunnelmikroskopie wurden Voraussetzungen für Oberflächenmeßgrößen der Rastertunnelmikroskopie geschaffen.

Bei der Tunnelmikroskopie wird mittels Piezostelltechnik eine Spitze in einem Bereich kleiner 1 nm an eine leitfähige Probenoberfläche gebracht. Wird zwischen Spitze und Probenoberfläche eine elektrische Spannung angelegt, so beginnt ein Tunnelstrom in nA-Größenordnung zu fließen. Eine Veränderung des Spaltes zwischen Spitze und Probenoberfläche von z. B. 0,1 nm bewirkt eine Veränderung des Tunnelstroms um eine Größenordnung. Diese starke Abstandsabhängigkeit wird ausgenutzt, um die Nadel mittels Piezostelltechnik der Probenoberfläche nach zuführen.

/G. Binning, H. Rohrer, "Scanning tunneling microscopy - from birth to adokescence", Rev. Mod. Phys. 49 (1982) 1, 57-61/.

Aus dem US-Patent 4,604,520 zur optischen Nahfeldmikroskopie ist bekannt, eine Apertur von 20 nm dadurch zu gewinnen, daß eine transparente pyramidale Kristallecke metallbeschichtet und die Spitze z. B. durch Ionenätzen wieder freigelegt wird. Das aus der Apertur austretende Licht durchstrahlt das Objekt oder wird an ihm reflektiert und von einem lichtempfindlichen Detektor als Meßsignal erfaßt. Die Führung der Sonde über die Objektoberfläche erfolgt mechanisch mittels Stylus wie beim Profilometer oder interferometrisch (Nomarskimethode), kapazitiv oder über das evaneszente elektromagnetische Feld.

Der Nachteil dieser Methoden besteht u. a. in der aufwendigen Sondenpräparation und Sondenführung.

Eine weitere optische Nahfeldmikroskopie-Methode ist aus EP 0 545 538 bekannt geworden. Dabei wird eine Monomodglasfaser zu einer feinen Spitze ausgezogen und durch Bedampfungstechniken metallummantelt. Eine Apertur für den Lichtdurchtritt wird an der Faser Spitze freigehalten. Die Führung der Sonde über die Objektoberfläche erfolgt dadurch, daß die Glasfaser Spitze von einem Piezoröhrchen in laterale Schwingungen versetzt wird, diese Schwingungen durch die Nähe der Objektoberfläche gedämpft werden und die Schwingungsdämpfung von einem zusätzlichen optischen System gemessen wird. Die Meßsignale des optischen Systems dienen der Sondenführung. Ein photoempfindlicher Detektor erfaßt das das Objekt transmittierende oder reflektierende Licht und bildet das Meßsignal.

Sowohl diese, als auch alle bekannten technischen Lösungen der Sonden nahfeldoptischer Rastermikroskope besitzen den Nachteil, daß die erreichbaren Lichtintensitäten relativ gering sind und deshalb zu langsamen Scannzeiten eines Bildes führen.

Ausgehend von dem geschilderten Stand der Technik liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, mit einer neuen Anordnung die erreichbaren Lichtintensitäten zu erhöhen und gleichzeitig die Zeiten für das Scannen eines mikroskopischen Bildes zu verkürzen.

Diese Aufgabe wird bei einer gattungsgemäßen Sonde dadurch gelöst, daß die dem Objekt zugewandte Seite des optischen Wellenleiters als optisch hochbrechen-

de Mikrotastspitze derart ausgebildet ist, daß sie in beiden zur Lichtausbreitung senkrechten Richtungen jeweils zum Objekt hin auslaufend eine Breite von annähernd

$$B = \frac{\lambda}{2n}$$

besitzt, wobei  $\lambda$  die Vakuumwellenlänge des verwendeten Lichtes und  $n$  der Brechungsindex des optischen Wellenleiters ist und daß der optische Wellenleiter mit einem piezoelektrischen Erreger mechanisch gekoppelt ist.

Gemäß einer bevorzugten Weiterbildung der Erfindung wird der optische Wellenleiter von dem piezoelektrischen Erreger in einem breiten Bereich umschlossen.

Es ist vorteilhaft, daß an der dem Objekt abgewandten Seite des optischen Wellenleiters ein optisches System zur Lichtein-/auskopplung der dem optischen System nachgeordneten Lichtquelle/Lichtempfänger angebracht ist.

Bei einer vorteilhaften Ausbildung der Erfindung besteht das optische System aus einem dem optischen Wellenleiter zugewandten linsenförmigen Teil, einem Faserkern und einer Lichtleitfaser.

Es ist weiterhin von Vorteil, daß der optische Wellenleiter an der dem Objekt abgewandten Seite die geometrische Form eines Balkens aufweist.

Gemäß einer Ausgestaltung der Erfindung besteht der optische Wellenleiter aus Siliciumkarbid (SiC).

Es ist auch von Vorteil, daß der piezoelektrische Erreger aus Aluminiumnitrid (AlN) besteht.

Bei einer weiteren vorteilhaften Ausbildung der Erfindung besitzt der piezoelektrische Erreger die geometrische Form eines mittig eingespannten Balkens.

Bei einer weiteren Ausbildung der Erfindung besitzt der piezoelektrische Erreger die geometrische Form eines einseitig eingespannten Balkens.

Es ist weiterhin vorteilhaft, daß der piezoelektrische Erreger aus einem für die verwendete Lichtwellenlänge transparenten Material mit einem Brechungsindex besteht, der geringer als der des optischen Wellenleiters ist und daß der piezoelektrische Erreger ein cladding für den optischen Wellenleiter bildet.

Bei einer weiter bevorzugten Weiterbildung der Erfindung ist das dem Objekt abgewandte Ende des optischen Wellenleiters mit einer Halbleiterdiode optisch gekoppelt, die Licht emittieren oder empfangen kann.

Gemäß einer Ausgestaltung der Erfindung besteht der optische Wellenleiter aus einem dotierten Halbleitermaterial und es ist das dem Objekt abgewandte Ende des optischen Wellenleiters mit einem elektrischen Kontakt versehen.

Es ist weiterhin vorteilhaft, daß der optische Wellenleiter selbst als piezoelektrischer Erreger ausgestaltet ist.

Mit der erfindungsgemäßen Lösung wird eine hohe Lichtintensität erreicht, wodurch sich die Zeiten für das Scannen eines mikrooptischen Bildes verkürzen.

Der Querschnitt des optischen Wellenleiters kann sehr gering sein, wodurch eine lokale Beleuchtung eines Objektes mit großer Lichtstärke oder die lokale Erfassung der Lichtintensität im Nahfeld eines Objektes mit geringen optischen Verlusten möglich ist.

Die erfindungsgemäße mikrooptische Sonde soll nachstehend anhand eines Ausführungsbeispieles näher erläutert werden.

Bei der in der Figur schematisch dargestellten mikrooptischen Sonde sind der Übersichtlichkeit wegen einzelne Teile nicht in den tatsächlich vorteilhaften Größen zueinander wiedergegeben.

Mit der mikrooptischen Sonde können die optischen Eigenschaften eines Objektes 1 gemessen werden. Ein optischer Wellenleiter 4, ein Dünnschicht-Wellenleiter, besteht aus dem für die verwendete Wellenlänge transparenten und besonders hochbrechenden Material Siliziumkarbid (SiC). Eine dem Objekt 1 zugewandte Mikrotastspitze 2 des optischen Wellenleiters 4 besitzt in den beiden zur Lichtausbreitung senkrechten Richtungen jeweils eine Breite, die etwa gleich der halben Wellenlänge des verwendeten Lichtes, dividiert durch den Brechungsindex  $n$  des Materials des optischen Wellenleiters 4 ist. Der optische Wellenleiter 4 ist mit einem piezoelektrischen Erreger 3 mechanisch gekoppelt. Das dem Objekt abgewandte Ende des optischen Wellenleiters 4 ist mit einer Lichtquelle 5 optisch über eine Lichtleitfaser 6 gekoppelt. Ein optisches System, bestehend aus der Lichtleitfaser 6 mit einem Faserkern 8 ist zur Vermeidung größerer Koppelverluste mit einem linsenförmigen Teil 7 versehen. Dadurch wird das Licht der Lichtquelle 5 auf das dem Objekt abgewandte Ende des optischen Wellenleiters 4 fokussiert. Der piezoelektrische Erreger 3 besitzt die geometrische Form eines Balkens, der in seinem Mittelteil im Bereich des Schwingungsknotens gehalten ist. Er wird durch die beiden Schichten 9, 10 gebildet, die aus Aluminiumnitrid (AlN) bestehen. Das AlN besitzt eine niedrige Brechzahl als das SiC und bildet deshalb ein Cladding für den optischen Wellenleiter. Der optische Wellenleiter 4 ist innerhalb des piezoelektrischen Erregers 3 zwischen den piezoelektrischen Schichten 9, 10 angeordnet und besitzt außerhalb des piezoelektrischen Erregers 3 objektsseitig einen Taper 11, der das Licht in die Mikrotastspitze 2 überführt. Der piezoelektrische Erreger 3 wird mittels der Elektroden 12, 13 zu Schwingungen angeregt. Die Länge  $L$  des piezoelektrischen Erregers 3 ist so gewählt, daß sie in etwa einer viertel Wellenlänge der akustischen Welle des piezoelektrischen Erregers 3 bei vorgegebener Anregungsfrequenz entspricht. Auf diese Weise wird eine Längsresonanz des piezoelektrischen Erregers 3 parallel zur Ausbreitungsrichtung des Lichtes ermöglicht. Die Länge  $L$  ergibt sich dabei näherungsweise nach der Formel  $L = c/(4f)$ , wobei  $c$  die Schallgeschwindigkeit im piezoelektrischen Erreger 3 und  $f$  die Frequenz der piezoelektrisch angeregten Schwingung ist. Bei einer Arbeitsfrequenz von  $f = 50$  MHz und einer Schallgeschwindigkeit von  $c = 2,5 \cdot 10^3$  m/s für AlN ergibt sich eine Länge  $L = 12,5 \mu\text{m}$  für den piezoelektrischen Erreger. Die elektrischen Zuleitungen 14, 15 für die Elektroden 12, 13 des piezoelektrischen Erregers 3 sind über Kontaktinseln 16 angeschlossen. Die gesamte Anordnung befindet sich auf einem Substrat 17 aus Silizium (Si).

Das Substrat 17 kann beispielsweise eine Fläche von ca.  $1 \text{ mm}^2$  und eine Dicke von ca.  $300 \mu\text{m}$  besitzen.

Die Fixierung der Lichtleitfaser 6 auf dem Si-Substrat 17 erfolgt durch eine in das Substrat eingezägte V-förmige Nut.

Der piezoelektrische Erreger 3 und der dem Objekt zugewandte Teil des Lichtwellenleiters 2, 11 bestehen aus freitragenden Schichten, um die freie Schwingung des Piezoresonators zu gewährleisten.

# Patentansprüche

1. Mikrooptische Sonde für Rastermikroskope, bestehend aus einem piezoelektrischen Erreger (3), einem optischen Wellenleiter (4) und einer Mikrotastspitze (2), dadurch gekennzeichnet, daß die dem Objekt zugewandte Seite des optischen Wellenleiters (4) als optisch hochbrechende Mikrotastspitze (2) derart ausgebildet ist, daß sie in beiden zur Lichtausbreitung senkrechten Richtungen jeweils zum Objekt hin aus laufend Abmessungen von annähernd

$$B = \frac{\lambda}{2n}$$

besitzt, wobei  $\lambda$  die Vakuumwellenlänge des verwendeten Lichtes und  $n$  der Brechungsindex des optischen Wellenleiters (4) ist und daß der optische Wellenleiter (4) mit dem piezoelektrischen Erreger (3) mechanisch gekoppelt ist.

2. Mikrooptische Sonde nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Wellenleiter (4) von dem piezoelektrischen Erreger (3) in einem breiten Bereich umschlossen ist.

3. Mikrooptische Sonde nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß an der dem Objekt abgewandten Seite des optischen Wellenleiters (4) ein optisches System zur Lichtein-/auskopplung der dem optischen System nachgeordneten Lichtquelle/Lichtempfänger (5) angebracht ist.

4. Mikrooptische Sonde nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß das optische System aus einer dem optischen Wellenleiter (4) zugewandten Lichtleitfaser (6) mit einem linsenförmigen Teil (7) und einem Faserkern (8) besteht.

5. Mikrooptische Sonde nach Anspruch 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Wellenleiter (4) an der dem Objekt abgewandten Seite die geometrische Form eines Balkens aufweist.

6. Mikrooptische Sonde nach Anspruch 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Wellenleiter (4) aus Siliziumkarbid (SiC) besteht.

7. Mikrooptische Sonde nach Anspruch 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß der piezoelektrischen Erreger (3) aus Aluminiumnitrid (AlN) besteht.

8. Mikrooptische Sonde nach Anspruch 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß der piezoelektrische Erreger (3) die geometrische Form eines mittig eingespannten Balkens besitzt.

9. Mikrooptische Sonde nach Anspruch 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß der piezoelektrische Erreger (3) die geometrische Form eines einseitig eingespannten Balkens besitzt.

10. Mikrooptische Sonde nach Anspruch 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß der piezoelektrische Erreger (3) aus einem für die verwendete Lichtwellenlänge transparenten Material besteht, der geringer als der des optischen Wellenleiters (4) ist und daß der piezoelektrische Erreger (3) ein cladding für den optischen Wellenleiter (4) bildet.

11. Mikrooptische Sonde nach Anspruch 3 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß das dem Objekt abgewandte Ende des optischen Wellenleiters (4) mit einer Halbleiterdiode optisch gekoppelt ist, die Licht emittieren oder empfangen kann.

12. Mikrooptische Sonde nach Anspruch 1 bis 11,

dadurch gekennzeichnet, daß der optische Wellenleiter (4) aus einem dotierten Halbleitermaterial besteht und daß das dem Objekt abgewandte Ende des optischen Wellenleiters (4) mit einem elektrischen Kontakt versehen ist.

13. Mikrooptische Sonde nach Anspruch 1 und 3 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß der optische Wellenleiter (4) selbst als piezoelektrischer Erreger (3) ausgestaltet ist.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

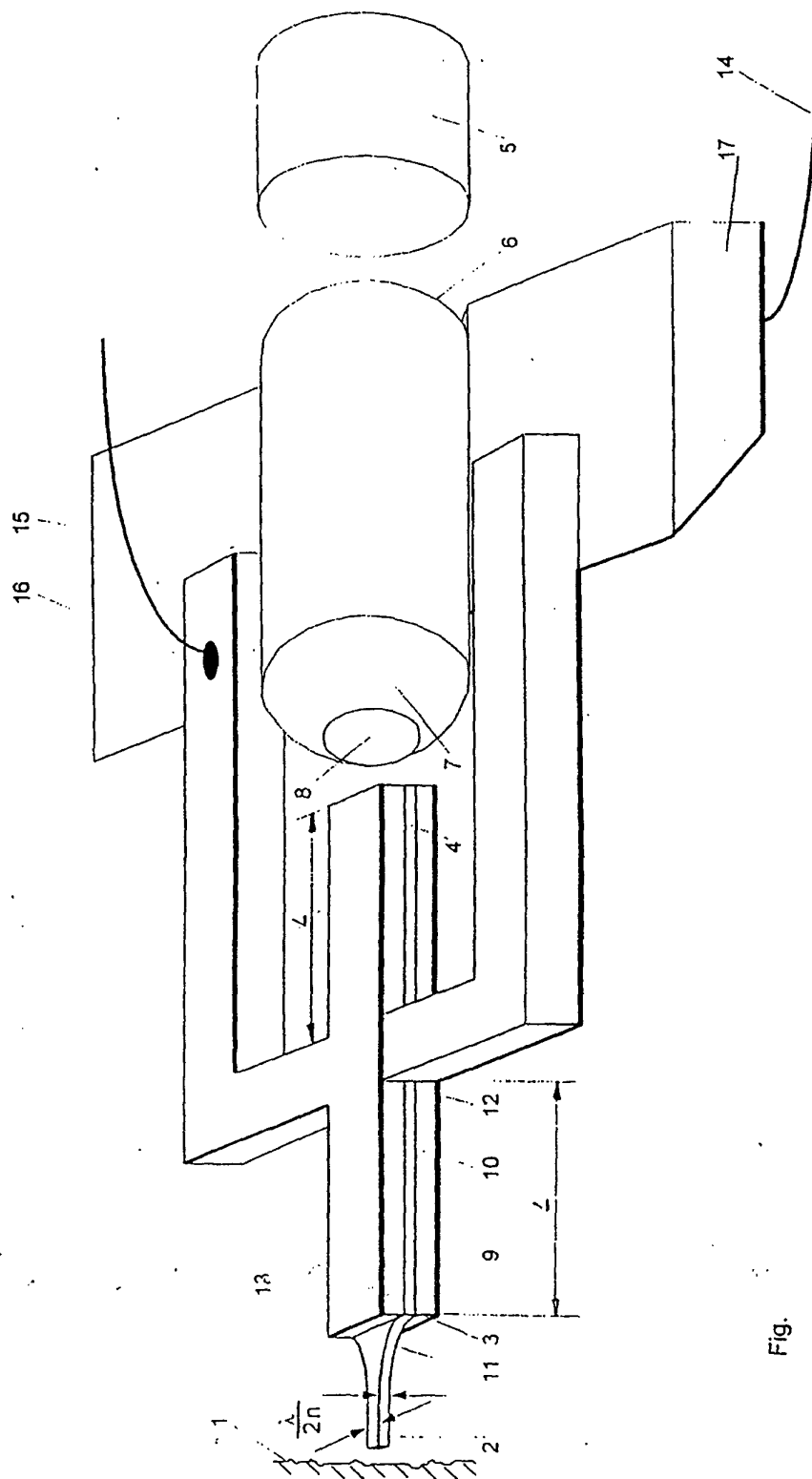


Fig.